

PROBLEMATIKA VÝROBY ODLITKŮ LISOVACÍCH NÁSTROJŮ

A. HERMAN¹, A. MORES²

ABSTRACT: This research report deals with analysis of large shape-difficulty casting of stamping die for automotive industry – made from materials steel, grey iron and ductile iron. The main goal of this research is to choose a material for any type of stamping die. Second goal is to find problematic areas in the casting design and to change the stamping die design and to recommend optimal technology for casting. The results of this research confirm trend of using ductile iron as better and more suitable material than steel.

KEY WORDS: stamping die, full mould technology, casting design, ductile iron

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Na FS ČVUT v Praze – Ústavu strojírenské technologie se provádí studie technologičnosti konstrukce velkých a tvarově složitých odlitků raznic vyráběných pro automobilový průmysl. Je důležité si uvědomit, že na jeden automobil je potřeba vyrobit několik desítek lisovacích nástrojů pro karosářské díly cca o celkové hmotnosti 1000 – 1500 tun – ve složitosti od hmotností cca 5 kg až po ty největší odlitky o hmotnostech 15 – 20 tun.

V zásadě se pro tyto nástroje v automobilovém průmyslu v EU používají 3 typy materiálů :

- Litina s kuličkovým grafitem (dále LKG) – v kvalitě dle DIN GGG 70 (dle ČSN EN GJS 700-2), či kvalitě GGG 70L (s legujícími prvky Cu, Ni a Mo)
- Litina s lupínkovým grafitem (dále LLG) – v kvalitě dle DIN GG 25 (dle ČSN EN GJL 250)
- Ocel na odlitky (dále jen ocel) – v kvalitě dle DIN 1681 – GS 45 (v ČSN lze najít pouze ekvivalent této normy - ČSN 42 2643) či DIN 1.0555 – GS 62 (v ČSN lze najít pouze ekvivalent této normy - ČSN 42 2660)
- Ocel pro malé namáhané odlitky dle DIN: **1.2320** (0,6 %C, 0,50 %Si, 1,2 %Mn, 2,5 %Cr, 0,7 %Mo a 0,1 %V – možný ekvivalent dle ČSN 415142, R_m cca 700 MPa), **1.2333** (0,57 - 0,61 %C, 0,25 - 0,45 %Si, 0,7 - 0,9 %Mn, <0,025 %P, <0,02 %S, 4,3 - 4,7 %Cr, 0,4 - 0,6 %Mo a 0,15 - 0,35 %V, R_m cca 850 MPa) a **1.2769** (0,4 - 0,5 %C, 0,25 - 0,5 %Si, 0,8 - 1,0 %Mn, 0,9 - 1,1 %Cr, 0,2 - 0,3 %Mo a 0,07 - 0,12 %V, R_m cca 850 MPa, po zakalení R_m > 1250 MPa)

V minulosti byla situace v rozložení materiálů zhruba následující – cca 40 % LLG, 30% LKG a 30% ocel na odlitky. Nyní se situace dále mění ve prospěch litin - současný podíl jednotlivých druhů materiálů na lisovacích nástrojích je následující:

- ➔ LLG spotřeba cca 50%, používá se pro horní a spodní základní díly velkých nástrojů, důvodem je vysoká tlumící schopnost LLG
- ➔ LKG spotřeba cca 40 %, používá se na detaily s vyšším mechanickým namáháním.
- ➔ Ocel spotřeba cca 10 %, používá se na nejvíce namáhané detaily sestavy lisovacího nástroje jak s hlediska mechanického tak otěruvzdorného.

Základní mechanické vlastnosti výše uvedených materiálů, charakteristiky a jejich popis je uveden v tabulce 1.

¹ Ing. Aleš Herman, Ph.D. - FS ČVUT v Praze, Ústav strojírenské technologie, Praha, ČR

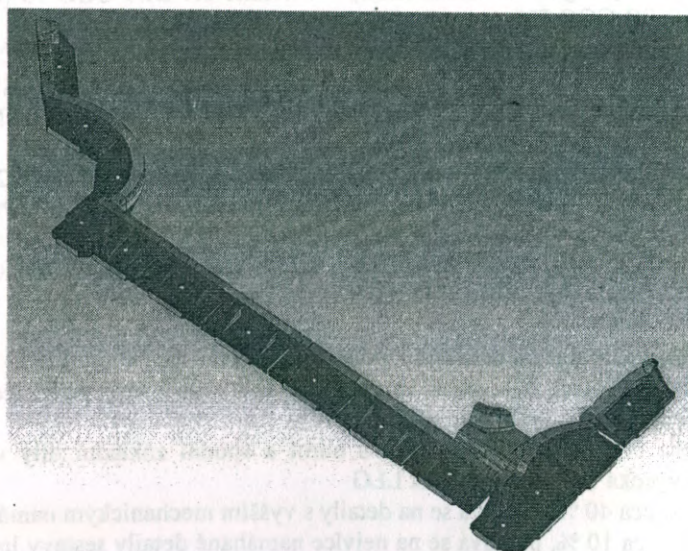
² Doc. Ing. Antonín Mores, CSc. - AGMA Praha, a.s.

V tomto příspěvku se zaměříme zejména na menší díly do lisovacích nástrojů – tvarovou tažnici (hmotnost cca 3,9 t) a střížné nože lisovacích nástrojů (hmotnost cca od 5 do 120 kg). Ukázkou tvarové složitosti a složení střížné části nástroje prezentuje obr. 1.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti materiálů nejvíce používaných na raznice

**Předpisy výrobců raznic používají vnitřní označení GS 62, tento materiál je téměř totožný s materiálem dle DIN GS 60 (vyšší hodnoty R_m a $R_{p0,2}$)*

Kriteria volby materiálu odlitku	LLG EN GJL 250	LKG EN GJS 700-2	Ocel GS 62*	Ocel 1.2333
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	---	420	350	---
Mez pevnosti R_m [MPa]	250	700	620	850
Tažnost A5 [%]	---	2	15	---
Charakteristika	Struktura tvořena převážně perlitem (u tenčích stěn převládá perlit) s lupínkovým grafitem.	Struktura je tvořena perlitem, feritem a zrnitým grafitem. Vzhled lomu je světle šedý	Perliticko-feritická uhlíková ocel na odlitky, určená k všeobecnému použití a pro vyšší tlaky a namáhání.	Nízkolegovaná ocel určená pro střížné nože do lisovacích nástrojů



Obr. 1 Sestava střížných nožů v lisovacím nástroji

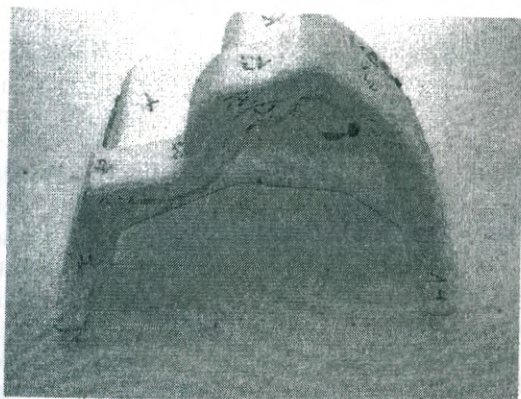
2 PROBLEMATIKA VÝROBY RAZNIC – FULL MOULD TECHNOLOGY

Dříve se odlitky odlévaly s omezenou velikostí a tvarovou složitostí s použitím jader a to převážně do forem vyrobených ze samotuhnoucích formovacích směsí, většinou na bázi vodního skla. Zvláštní části výroby pak tvořily základní součásti lisů pro výrobu automobilových karoserií. Tyto odlitky, obecně nazývané raznice, vyráběly se formováním na dřevěné modely s pomocí komplikovaných

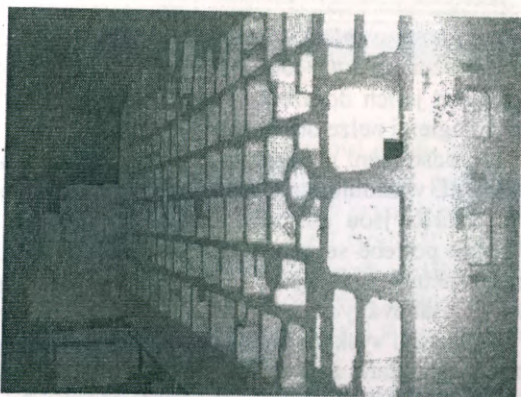
jaderníků. Přibližně od 70. let 20. století se stávala být situace neudržitelná. Tímto způsobem už nebylo možné vyrábět stále komplikovanější odlitky. Začínají se zvětšovat požadavky na tvarovou složitost, jakost a hospodárnost. V této době vzniká výroba tzv. metodou spalitelného modelu, při které je model přesnou kopií požadovaného odlitku. Princip této metody spočívá v odpařování polystyrenového modelu, který zůstává zaformován ve formě ze samotuhnoucí směsi, většinou na bázi pryskyřic. Během odlévání se polystyren vypařuje (případně rychle hoří) před postupujícím žhavým kovem, ten okamžitě zaplňuje vznikající dutinu. Aby se netvořilo velké množství neodpařených zbytků, volí se polystyren o malé hustotě. Uvolňované plyny vnikají do formovací směsi, která jejich podstatnou část zachytí. Zbývající část těchto plynů však uniká do ovzduší. Hlavními smysly vývoje této technologie je:

- snížení nákladů na výrobu modelového zařízení při kusové výrobě,
- lití tvarově složitých dílů bez nutnosti vyjímání modelu,
- dosažení vyšší přesnosti,
- odstranění potřeby používání jaderníků, úkosů, úprav dělicí roviny, vnějších jader, komplikovaného skládání forem,
- zhotovování modelů bez dělicí roviny
- opětovné použití formovacích směsí

Ukázka takto vyrobených polystyrenových modelů je vidět na obrázcích 2 a 3.



Obr. 2 PS model velké raznice odlitku z LKG



Obr. 3 PS model střižného nože pro ocel

3 OBECNÝ ROZBOR TECHNOLOGIČNOSTI KONSTRUKCE TVAROVĚ ČLENITÝCH ODLITKŮ ČÁSTÍ RAZNIC

Konstrukční návrh odlitku bez znalostí postupu výroby s sebou přináší problémy, které se řeší vhodnou úpravou konstrukce odlitku. V konstrukci odlitků musí být uváženy všechny požadavky vyplývající především z funkce konkrétní součásti, použité technologie výroby a hospodárnosti výroby.

Konstrukci odlitků u běžných odlitků vyráběných klasicky nejvíce ovlivňují tyto zásady:

- složitost tvarů
- dle způsobu lití se volí vhodná konstrukce odlitku
- model odlitku musí mít co nejmenší počet dělicích ploch, výstupků a volných částí
- dělicí plocha by měla být rovinná
- pro snadné vyjmutí modelu z formy je nutno volit dostatečné úkosy odlitku
- odlitek by neměl mít velké rozdíly v tloušťce stěn
- je nutné aby se tloušťka stěn směrem k nálitkům zvětšovala
- aby ve spojích stěn nedocházelo k vzniku trhlin, je nutno v těchto místech volit vhodná zaoblení nebo výztužná žebra

Na rozdíl od jiných technologií zpracování kovů, které pracují s polotovary známých vlastností, je jedinečností slévárenské technologie skutečnost, že struktura materiálu a tvar výrobku vznikají

společně v relativně velmi krátkém časovém intervalu bez možnosti průběžných korekcí. Jakost odlitků tím ovlivňuje velké množství faktorů postihující konstrukci a stav modelového zařízení, vlastnosti formovací směsi a odlévané slitiny, technologii a podmínky výroby forem a lití, chladnutí a následující zpracování odlitků.

Volba nevhodné technologie nebo nedodržování technologických podmínek způsobuje kolísání kvality a vznik více či méně závažných vad odlitků. Jejich výskytu musejí výrobci předcházet pečlivou přípravou výroby a kontrolou všech rozhodujících fází technologického procesu. Tím se ve stále větší míře přesouvá zodpovědnost za nedostatky a selhání litých dílů na konstruktéry, kteří neodhadli správně provozní zatížení odlitků, zvolili nevhodný materiál, očekávali od odlitků dosažení nereálných vlastností nebo jejich kombinací, nerespektovali zásady konstrukce s ohledem na slévarenskou technologii nebo nespecifikovali dostatečně svoje požadavky. Vhodnou volbou materiálu a konstrukce i konzultacemi s výrobcí odlitků, je možno řadě obtíží a nedostatků předcházet.

K hlavním nevýhodám (či spíše skutečnostem, které je třeba vždy respektovat) slévarenské technologie patří:

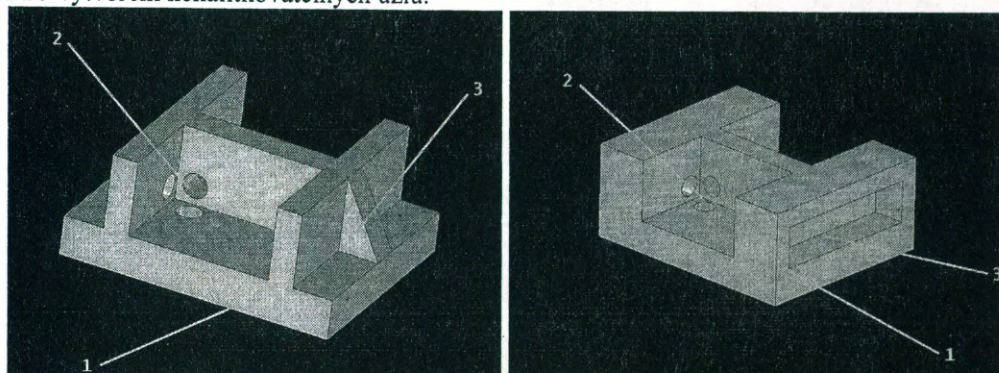
- Rozdíly v tloušťce stěn odlitku vedou k nerovnoměrnému tuhnutí a chladnutí, která způsobují rozdíly ve struktuře a vlastnostech jednotlivých částí odlitku, vznik pnutí, deformací, až poruch souvislosti (trhlin, prasklin).
- Pomalé chladnutí silnostěnných odlitků vede ke vzniku hrubozrnné struktury, odmíšenin, zhoršení mechanických vlastností a rozdílu vlastností na povrchu a uvnitř odlitku.
- Vlastnosti uváděné v normách a materiálových listech slévarenských slitin jsou vztahovány na vzorky standardních rozměrů lité určitou technologií. U masivních odlitků je obvykle nereálné vyžadovat jejich dosažení v plném rozsahu. U obdobných odlitků litých z určité slitiny odlišnými technologiemi nelze očekávat shodné vlastnosti.
- Pro odstranění nedostatků lící struktury a dosažení v normách uváděných hodnot mechanických vlastností, vyžaduje řada odlitků tepelné zpracování. To platí pro ocelové odlitky. U výše uvedených jakostí LKG jsou normami stanovené vlastnosti dosažitelné i bez tepelného zpracování. O jeho případné potřebě se pak výrobce rozhoduje na základě výsledků zkoušek mechanických vlastností nebo struktury. Odlitky z LKG se tepelně zpracovávají jen výjimečně, neboť požadované vlastnosti tu bývají dosahovány převážně vhodnou volbou složení a metalurgie.
- Nebezpečí výskytu vnitřních vad (staženin, porezity, bublin apod.) může být výrazně eliminováno konstrukcí, která zajišťuje vhodný postup tuhnutí, pamatuje na přístupnost pro umístění nálitků (případně chladítek) i možnost odvodu plynů z formy a jader.
- Velké smršťování některých slitin při tuhnutí vyžaduje používání mohutných nálitků, které snižují využití tekutého kovu a zvyšují pracnost při úpravě odlitků. Přednost by proto měla být dávana takovým slitinám, které stahují méně (např. litiny) a takovým konstrukcím odlitků, které jsou co nejlehčí (potřebný objem nálitků je úměrný objemu odlitku).
- Omezená možnost odlévat odlitky s velmi malou tloušťkou stěn. Nejlepší zabíhavost mají eutektické slitiny, tedy např. ze slitin železa eutektické litiny, kterým je třeba dávat přednost při konstrukci tenkostěnných odlitků před litinami podeutektickými a ocelmi.
- Omezená možnost dosáhnout vysoké přesnosti a jakosti povrchu. S ohledem na ni je třeba usilovat o taková konstrukční řešení, která kladou nejmenší nároky na potřebu obrábění, a to tím více, čím pevnější a tvrdší je zvolený materiál.

4 ROZBOR TECHNOLOGIČNOSTI KONSTRUKCE VELKÝCH ODLITKŮ RAZNIC

Bohužel lze konstatovat, že výše uvedené zásady konstrukce odlitků nejsou u většiny raznic dodrženy – je to zejména z důvodu, že konstruktéři raznic se spíše snaží dodržet činný tvar pro technologii lisování a tomu pak přizpůsobují dané odlitky.

Dalším požadavkem je poloha odlitku ve formě a tím pádem i určené nálitkování – kvalitnější materiál je vždy ve spodní polovině formy – tzn. že činná část nástroje musí být zaformována do spodní části formy a nálitkovat odlitek je možné pouze přes upínací plochu k lisu a přes žebrovaní.

Pokud se týká největších problémů v konstrukci, zejména se jedná o napojení různých tloušťek stěn, vytváření žebrování do tepelných uzlů typu X (velké riziko vzniku trhlin) a umístění technologických otvorů. Nejtypičtější vady v konstrukci raznic jsou modelově zobrazeny na obr. 4 a 5. – na těchto obrázcích jsou typické výřezy z odlitků raznic pro automobilový průmysl a uvedena problémová místa. Obr. 4 popisuje pod jednotlivými odkazy - 1 napojení rozdílných tloušťek stěn, 2 technologické otvory pro kontrolní čidla a 3 napojení rozdílných tloušťek stěn do uzlu, který nelze nátlíkovat – jde odstranit pouze použitím chladítek. Podobná situace je na výřezu raznice na obr. 5 – pod jednotlivými odkazy - 1 napojení rozdílných tloušťek stěn, 2 technologické otvory pro kontrolní čidla a 3 vytvoření nenátlíkovatelných uzlů.



Obr. 4 a 5 Detaily části raznic – modelové zjednodušení

Největším problémem je z hlediska tuhnutí umístění otvorů pro čidla do základové desky nástroje a do žebrování – ve většině případů tak, že brání usměrněnému tuhnutí odlitků. Další problém je napojování rozdílných tloušťek stěn a vytváření násobných tepelných uzlů. Již při prvních pohledech na raznice lze pozorovat jejich složitosti, mnoho konstrukčních (tepelných) uzlů typu „T“, znatelné rozdíly v tloušťkách stěn, příčné i podélné stěny a žebra ležící od sebe v blízkých vzdálenostech. Charakter a počet těchto kritických míst vede k úvaze, že u takto komplikovaných odlitků nebude dodrženo pravidlo usměrněného tuhnutí. (viz obr. 6) – raznice o hmotnosti cca 3,9 tun. V tomto výzkumu již bylo analyzováno několik raznic v hmotnostech od 10 t do 13 t.

5 ANALÝZA VÝROBNÍCH VARIANT TAŽNICE

Simulace tuhnutí raznice byla provedena pro výše uvedené materiály – LKG, LLG a ocel na odlitky GS 62. Cílem je porovnání jejich vhodnosti k použití pro odlitky raznice velkých rozměrů a složitého tvaru vzhledem ke vzniku nebezpečných míst v odlitku a skrytých vad (staženin, ředin

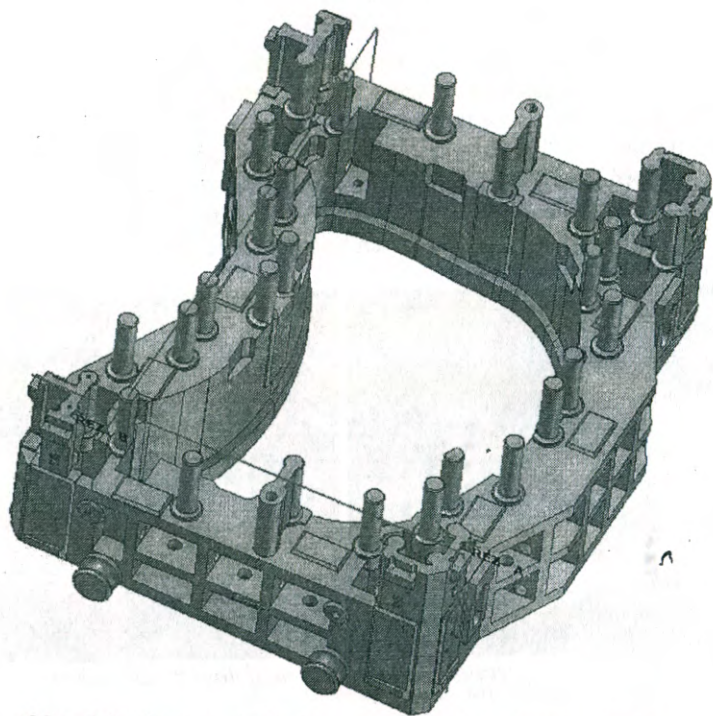
Simulace byly provedeny v následujících variantách:

1. Varianta bez chladítek a nátlíků – tato varianta se hlavně u oceli, vzhledem k jejímu velkému smrštění při tuhnutí a chladnutí, v praxi nepoužívá, jedná spíše o experimentální simulaci.
2. Varianta s nátlíky – nátlíky byly použity po celé vrchní části raznice, v této variantě jsou zvoleny nátlíky z oceli i litiny stejných velikostí, která odpovídá max. možné velikosti nátlíků – vzhledem k odstupu nátlíků tak, aby se tepelně neovlivňovaly.
3. Varianta s chladítky, nátlíky a izolací – nátlíky a chladítky nebylo dosaženo odstranění staženin po povrchu, které vznikly v masívu materiálu. V kritických místech pro tuhnutí musel být použit izolační materiál.

Pro vyhodnocení byl použit simulační software NOVAFlow&Solid.

Charakteristika zadané raznice (viz obr. 6)

Délka 2290 mm, šířka 1740 mm, výška 425 mm - hmotnost raznice z LKG - cca 3880 kg



Obr. 6 Analyzovaná tažnice s naznačenými zkoumanými řezy

6 ANALÝZA VÝROBNÍCH VARIANT STŘIŽNÝCH NOŽŮ

V rámci studie malých odlitků střížných nožů se zaměřujeme na ideální vztah konstrukce a technologie. Tvar nože bývá nejčastěji napojení z profilu do tvaru U – tzn. že je nutné technologické opatření k odstranění spodního tepelného uzlu (viz naznačená vepsaná koule – obr. 7).

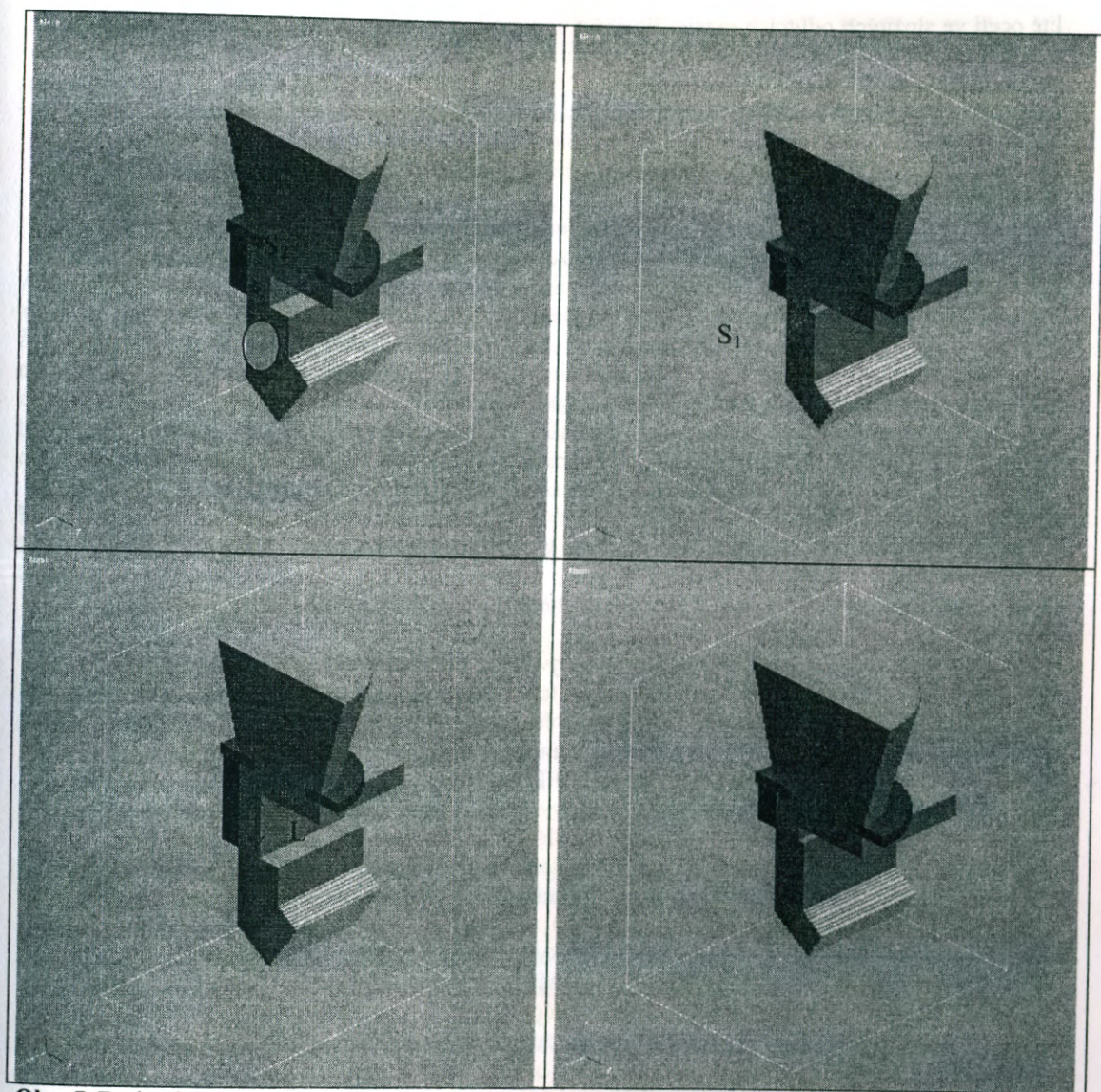
Technologické možnosti odstranění tohoto tepelného uzlu:

1. Přidání podnálitkového klínu – nevýhoda – mění tvar součásti, navyšuje její hmotnost a je nutné jej obrábět
2. Použití naddimenzovaného nálitku tak, aby došlo k „prosazení“ přes prohřátou formovací směs, čili určité popření Heuversova pravidla „vepsaných koulí“
3. Použití chladítka, či chladicí formovací směsi (na bázi chromitu)
4. Použití izolační desky na boku pod nálitkem
5. Kombinace výše uvedených opatření – bez varianty 1

Úkolem této studie je najít metodologii pro různé tloušťky S_1 a S_2 a délky tenké stěny nožů L (viz obr. 7). Bylo zatím provedeno několik stovek simulací pro jednotlivé varianty a zatím výsledky ukazují, že pokud $S_1=L$, tak ve furanové formovací směsi dojde k „prosazení“ – tj tepelný uzel je vytážen ven přes formovací směs – toto nám potvrzují i experimenty ve slévárnách. Zatím jako nejvýhodnější varianta, kdy získáme zdravý odlitek, se jeví pro všechny tvary použití nálitku, izolační desky a chladítka.

7 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

Analýzou technologičnosti konstrukce raznic bylo zjištěno velké množství tepelných uzlů a určité rozdíly v tloušťkách stěn. Raznice dále obsahuje žebra ležící od sebe v blízkých vzdálenostech, příčné a podélné desky. Tato všechna kritická místa činí odlitek raznice pro odlévání komplikovaným.



Obr. 7 Zjednodušený model střížného nástroje – různé varianty konstrukce (světle modrá – odlitek s nálitkem, tmavomodrá – izolační deska, červená – podnálitková podložka, žlutá – chladítko)

Nerovnoměrným tuhnutím a chladnutím odlitku dochází k:

- ➔ výskytu vnitřních vad,
- ➔ zhoršením mechanických vlastností na povrchu i uvnitř odlitku,
- ➔ vzniku pnutí a deformací – v některých případech ke vzniku trhlin a prasklin,
- ➔ rozdílu ve struktuře a vlastnostech jednotlivých částí,
- ➔ vzniku hrubozrné struktury.

Na základě analýzy technologičnosti konstrukce raznice a vyhledání nebezpečných míst v odlitku ve kterých by při tuhnutí a chladnutí mohlo docházet k vnitřním vadám byly k simulacím tuhnutí vytipovány řezy v podélných i příčných řezech. V těchto řezech byly pro dosažení vhodné varianty umístění chladítek a nálitků sledovány podíly tekuté fáze, rozložení teploty, teplotní moduly, vady v odlitku – staženiny a porezita (Niyama kritérium).

Raznice z litých ocelí vykazují vyšší množství ředin a staženin, což potvrdily provedené simulace. Je proto správné, že v současné době dochází v automobilovém průmyslu ke snížení podílu materiálu

litě oceli ve složitých odlitcích raznic. Přechází se zejména na materiál LKG, u zvláště namáhaných dílů pak dochází k nahrazení oceli za LKG s označením EN – GJS – 700-2. Dalším důvodem tohoto trendu je u ocelových odlitků odlévání z vyšších licích teplot větší nebezpečí vzniku trhlin a prasklin které vedou ke zhoršení jakosti povrchu odlitků. Dále je nutné podotknout, že se ocelové odlitky musí žíhat normalizačními cykly. U odlitků z LKG se žíhání neprovádí. Srovnání výsledků simulace pro jednotlivé varianty a materiály ukazuje obr. 8. Reálná vada vzniklá na odlité raznici je vyfotografována na obr. 9.

I přes to, že raznice obsahuje mnoho kritických míst, tepelných uzlů a znatelných změn v tloušťkách stěn, nedochází u LKG vlivem grafitické expanze k vyššímu množství ředin a staženin. Z výsledků simulací je znát, že se u LKG a LLG jedná spíše o řediny, u oceli je vhodné hovořit o staženinách.

Pro LKG i litou ocel byly pro vyhodnocení chladnutí a tuhnutí odlitku vybrány různé varianty. V řadě prvních variant byla simulace lití odlitku raznice provedena bez chladítek a nálitků, kdy je v důsledku smršťování kovu při tuhnutí a chladnutí u obou materiálů na povrchu pozorovatelná rovnoměrná povrchová staženina. Vlivem grafitické expanze u LKG dochází v odlitku pouze k drobným ředinám a při započtení přídatku na obrábění povrchové staženiny by takto odlitý odlitek byl jakostním odlitkem. Na základě těchto výsledků simulací doporučujeme, po dalším zvážení konstruktérů a technologů, tuto variantu k odlévání z LKG, neboť ze všech provedených simulací jsou výsledky pro skutečné odlití raznice jedny z nejpříznivějších.

Ve variantě simulací pouze s použitím chladítek k zchlazení funkční plochy kdy její zchlazení má za cíl umožnit rychlé ztuhnutí a omezení vnitřních vad v jejím blízkém okolí. V horních částech styku žeber s podélnými deskami vznikají řediny a staženiny, objevují se kritická místa v tepelných uzlech odlitku.

Další varianta spočívala pouze v nálitkování největšího možného množství tepelných uzlů. Tímto však dochází k nárůstu hmotnosti odlitku, vzniku tepelných uzlů v nálitcích a staženinám vznikajících pod nálitky, kterým by bylo možné předejít zvětšením nálitků (umožnění jejich základní funkce dosazování tekutého kovu). I zde platí, že ve variantách z litě oceli jsou v důsledku jejího smrštění při tuhnutí a chladnutí, oproti variantám z LKG a LLG, staženiny většího charakteru – zejména díky velkému prohrátí horní poloviny formy. Tyto výrobní varianty s velkým množstvím nálitků na základě výsledků simulací nedoporučujeme k odlévání z litě oceli ani z LKG a LLG. Důvodem je značné prohrátí odlitku a oblasti nálitků, a tím pádem i zvýšené riziko výskytu větších vad.

Další provedené simulace se zabývaly optimalizací počtu nálitků a chladítek, tak aby bylo dosaženo kvalitního odlitku. S omezením množství nálitků zde dochází ke snížení množství vzniklých ředin a staženin které se pod nálitky tvořily. Nálitky a chladítka zde byla rozmístěna na základě provedených simulací ve výše uvedených variantách. Je třeba zdůraznit, že vzhledem k charakteru konstrukčního provedení raznice a použité technologie odlévání není bez konstrukční úpravy možné raznici odlít bez vnitřních vad a právě i toto potvrzují provedené simulace. Opět se ukázalo ve shodě s předešlými variantami i v tomto případě je litá ocel pro odlití odlitku raznice naprosto nevhodná. V případě LKG a LLG je situace příznivější.

Problémem je zde to, že velikost typizovaných nálitků vzhledem k šířce žeber nemůže být zvětšována. I přes to, že je raznice těžkým odlitkem komplikovaného tvaru s velkým množstvím tepelným uzlů a rozdílnými tloušťkami stěn tak se spoluprací konstruktérů s technologií dá najít řešení vhodné k odlití jakostního odlitku raznice. Jako nejvhodnější varianta se ze stávající studie, jeví materiál LKG. V žádném případě na tyto velké raznice nedoporučují k odlévání raznice volbu materiálu litou ocel.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HERMAN, A. : Problematika technologičnosti konstrukce a výroby velkých odlitků raznic, Slévárství 4/2007, p. 156 - 160
- [2] BEDNÁŘ, B. : Technologičnost konstrukcí, Učební texty FS ČVUT v Praze, 2006
- [3] Diplomové práce řešené na FS ČVUT v Praze, Ú12123 v letech 2005-2008

The research is supported by Specific Research by CTU – FME in Prague.